

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแจกแจงพลังงานในเตาเผาเซรามิก DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR ENERGY DISTRIBUTION IN CERAMIC KILN

มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล¹ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์² ธนวรรณ รัตนปริคณ³
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-22186642 โทรสาร 0-22186642 E-mail: fmemtt@eng.chula.ac.th¹, peterparn@hotmail.com³

Mingsak Tungtakul¹, Sompong Putivisitakul², Thanawat Rattanaparikon³
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phayathai Rd., Phatumwan Bangkok 10330 Thailand
Tel: 0-22186642 Fax: 0-22186642 E-mail: fmemtt@eng.chula.ac.th¹, peterparn@hotmail.com³

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การศึกษาหาพลังงานที่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิก และ พลังงานสูญเสียจากการเผาไหม้ ผลการศึกษาในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า พลังงานสะสมที่ผนังเตาเผาเซรามิกด้านข้างและด้านบนในการทดลอง แต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกันโดยคิดเป็น 7% ของพลังงานที่เข้าสู่เตาเผาเซรามิกทั้งหมด พลังงานที่ใช้ในการเผาเซรามิกจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่บรรจุภายในเตาเผาเซรามิก และพลังงานที่สูญเสียไปกับ ก๊าซเสียคิดเป็น 22-33% ของพลังงานที่เข้าสู่เตาเผาทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการให้ความร้อน

การศึกษาในส่วนที่สอง คือ การศึกษาหาผลกระทบของผนัง ที่มีต่อการใช้พลังงานในเตาเผาเซรามิก ในการศึกษาส่วนนี้จะให้ความสำคัญเฉพาะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนัง ด้านข้างและด้านบนที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในแก้ปัญหา เมื่อมีการ เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำผนังด้านข้างและด้านบนโดยให้ผนังครึ่งหนึ่งด้านใน ของเตาเผาเซรามิกเป็นเซรามิกไฟเบอร์คองเดิม ส่วนผนังอีกครึ่งหนึ่ง ด้านนอกเป็นวัสดุชนิดอื่น เช่น อิฐฉนวน IF135 และอิฐทนไฟ SK-30 ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการ กำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นคงเดิม พบว่าพลังงานที่ สะสมอยู่ในผนังเตาเผาเซรามิกที่ใช้ฉนวนสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกับการ ใช้ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์แต่เพียงอย่างเดียว

An Abstract

This study investigate the energy distribution in two section. The first section, study the energy distribution in ceramic

kiln and energy loss from combustion process. The result shows that the cumulative energy in the top and side walls of ceramic kiln of each experiment is similar. And the range of cumulative energy is 7 % of total energy consumption. The useful energy consumption mainly depends on the mass of product . Energy loss by flue gas is about 22-33% of energy consumption that depends on type of heating process.

And the last section, we study the effect of composited wall to energy distribution in the ceramic kiln. This section focus on temperature of the top and the side wall of the ceramic kiln which mathematical model is solved by finite-volume method. The experiment change the material of the top and the side wall to insulating brick (IF-135) and fired clay brick but remain inner wall to be ceramic fiber (SK-30). By using the same boundary and initial conditions for mathematical model and result show that the cumulative energy in composited wall is nearly to the single ceramic fiber wall

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกและอิฐในประเทศไทยมีจำนวน กว่า 2,000 โรงงาน นับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางภาคเหนือของประเทศไทยที่มี โรงงานผลิตเซรามิกอยู่เป็นจำนวนมาก โรงงานเซรามิกขนาดกลางและ ขนาดย่อม ที่มีข้อจำกัดด้านการลงทุนยังคงใช้เทคโนโลยีดั้งเดิมที่สืบทอดจากรุ่นก่อน และอุตสาหกรรมกลุ่มนี้จะประสบปัญหาในการใช้

พลังงานในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้พลังงานจำนวนมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการเผา ซึ่ง เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมนี้ ต้องใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยตรง และใช้ระยะเวลาในกระบวนการเผาค่อนข้างนาน ซึ่งสามารถประมาณได้ว่า 35% ของ ต้นทุนการผลิตมาจากการใช้เชื้อเพลิง ดังนั้นการช่วยให้ผู้ประกอบการ ในอุตสาหกรรมเซรามิกสามารถลดการใช้พลังงาน นอกจากจะเป็นการ ลดต้นทุนแล้วยังเป็นการประหยัดการใช้พลังงานของประเทศอีกทาง หนึ่งด้วย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองเป็นเตาเผาเซรามิกที่ใช้เซรามิกไฟเบอร์เป็นฉนวน ใช้เซรามิกไฟเบอร์ที่มีลักษณะเป็นบล็อกในการบุผนัง ซึ่งทนอุณหภูมิได้สูง บำรุงรักษาง่าย และ น้ำหนักเบาทำให้ดูดซับความร้อนได้น้อยเมื่อเทียบกับอิฐทนไฟ ทำให้ลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและมลภาวะอันเกิดจากการก๊าซเสีย นอกจากนี้เตาเผาเซรามิกที่ใช้เซรามิกไฟเบอร์เป็นฉนวนยังได้ใช้แผ่นบังคับความร้อน(Damper) เป็นตัวควบคุมการไหลของก๊าซเสีย(Draft) ภายในเตาเผาเซรามิกทำให้สามารถควบคุมบรรยากาศในการเผาไหม้ได้ ลักษณะของหัวเผาไหม้ได้มีการออกแบบให้เป็นหัวฉีดความดันสูง(High Pressure Nozzle) ทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการเผา เนื่องจากสามารถเร่งไฟได้

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเตาเผามีหลายทฤษฎี แต่ในบทความนี้จะใช้ทฤษฎีที่มีความสำคัญต่อการคำนวณมาแสดงเท่านั้นซึ่งจะประกอบไปด้วย

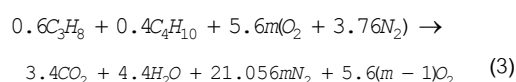
สมการสมดุลมวลของเตาเผาเซรามิก

$$\sum \dot{m}_p - \sum \dot{m}_r = \Delta \dot{m}_{CV} \quad (1)$$

สมการสมดุลพลังงานเตาเผาเซรามิก

$$\sum Q + \sum \dot{m}_p h_f - \sum \dot{m}_r h_f = \dot{E}_{CV} \quad (2)$$

สมการสมดุลเคมีเตาเผาเซรามิก



อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศที่ใช้ตามทฤษฎี

$$m = \frac{\left(5.6 - 2.2 \times \frac{\% O_2}{100} \right)}{\left(5.6 - 26.656 \times \frac{\% O_2}{100} \right)} \quad (4)$$

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาการใช้พลังงานและการกระจายของพลังงานในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลังงาน

เป็นแบบจำลองที่กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาพลังงานที่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆในกระบวนการเผาในเตาเผาเซรามิก โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) อุณหภูมิก๊าซเสียขึ้นอยู่กับเวลา
- 2) ส่วนประกอบของก๊าซเสียขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซหุงต้มเท่านั้น
- 3) คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของก๊าซเสียขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ
- 4) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับความดันก๊าซหุงต้มและเวลา
- 5) ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งคงที่ตลอดกระบวนการเผา
- 6) ไม่คำนึงถึงพลังงานที่สะสมในโครงสร้างรองรับเตาเผา
- 7) พลังงานที่สะสมในผลิตภัณฑ์เกิดจากมวลผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผาเซรามิก
- 8) ไม่คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียไปพร้อมกับมวลผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียระหว่างกระบวนการเผาในเตาเผาเซรามิก
- 9) อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสม่ำเสมอในทุกจุด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบน

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นเพื่อหาพลังงานที่สะสมอยู่ในผนังด้านข้างและด้านบน โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวลึก(แกน z)
- 2) อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสม่ำเสมอในทุกจุด ในช่วงเวลา t ใดๆ
- 3) ให้เตาเผามีลักษณะสมมาตรในแนวดิ่ง
- 4) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นเตากับผนังด้านข้าง

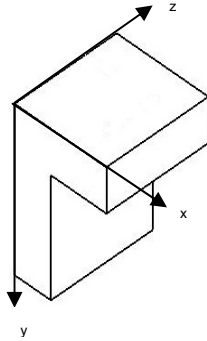
สมการเชิงอนุพันธ์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบนเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

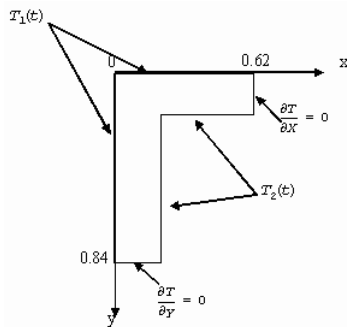
โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

- 1) $(T(0,y,t) = T_1(t), 0 \leq y \leq 0.84)$
- 2) $(T(0.23,y,t) = T_2(t), 0.23 \leq y \leq 0.84)$

- 3) $\left(\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x} \right)_{x=0.62} = 0, 0 \leq y < 0.23$
- 4) $T(x, 0, t) = T_1(t), 0 < x \leq 0.62$
- 5) $T(x, 0.23, t) = T_2(t), 0.23 \leq x \leq 0.62$
- 6) $\left(\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y} \right)_{y=0.84} = 0, 0 < x < 0.23$

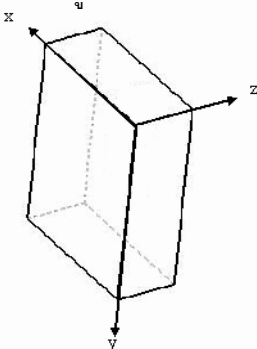


รูปที่ 1 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านบนและด้านข้างแบบ 3 มิติ

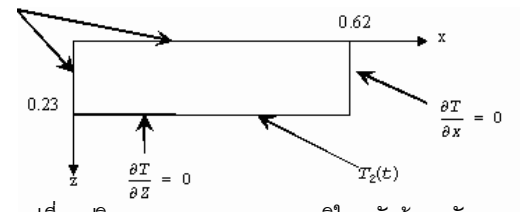


รูปที่ 2 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านหลังเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นเพื่อหาพลังงานที่สะสมอยู่ในผนังด้านหลัง



รูปที่ 3 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลังแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4 ปริมาตรควบคุมของอุณหภูมิในผนังด้านหลัง

สมการเชิงอนุพันธ์ของอุณหภูมิที่สะสมในผนังด้านหลังเขียนได้เป็น

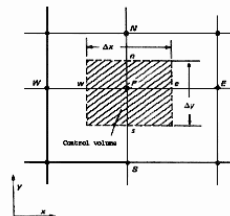
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

- 1) $T(x, 0, t) = T_1(t), 0 \leq x \leq 0.62$
- 2) $\left(\frac{\partial T(x,z,t)}{\partial z} \right)_{z=0.23} = 0, 0 < x < 0.23$
- 3) $T(x, 0.23, t) = T_2(t), 0.23 \leq x \leq 0.62$
- 4) $T(0, z, t) = T_1(t), 0.00 < z \leq 0.23$
- 5) $\left(\frac{\partial T(x,z,t)}{\partial x} \right)_{x=0.23} = 0, 0 < z < 0.23$

4.การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์

ในบทความนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยการนำสมการ control-volume discretization มาช่วย



รูปที่ 5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการนำความร้อน 2 มิติสำหรับสถานะไม่คงที่

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (5) เทียบกับปริมาตรควบคุมดังที่เห็นในรูปที่ 5 และทำการอินทิเกรตเทียบเวลาในช่วง t ถึง $t + \Delta t$ ได้

$$\int_n^s \int_e^w \int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_n^s \int_e^w \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_e^w \int_n^s \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dt \quad (7)$$

ในส่วนของเทอม $\frac{\partial T}{\partial t}$ เราสมมุติว่าให้ค่าอุณหภูมิ(T) มีผลต่อ

ปริมาตรควบคุมทั้งหมดในจุดนั้น จะได้เป็น

$$\int_n^s \int_e^w \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = \rho c \Delta x \Delta y (T_p^1 - T_p^0) \quad (8)$$

เทอม $\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$ บนปริมาตรควบคุมเขียนได้เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_n^s \int_e^w \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt \quad (9)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \Delta y \cdot \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt$$

เมื่อเราการประมาณค่า $\frac{\partial T}{\partial x}$ ในสมการที่ (9) จาก

สมมติฐานแบบ piecewise-linear จะเขียนได้เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_n^s \int_e^w \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt \quad (10)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \Delta y \left(\frac{k_e(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right) dt$$

เมื่อประยุกต์สมการที่ (8) –(10) ลงในสมการที่ (7) จะได้

$$\rho c \Delta x \Delta y (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\Delta y \left(\frac{k_e(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right) + \right. \quad (11)$$

$$\left. \Delta x \left(\frac{k_s(T_s - T_P)}{(\delta y)_s} - \frac{k_n(T_P - T_N)}{(\delta y)_n} \right) \right] dt$$

ในตอนนี้อะการประมาณค่า T_P, T_E, T_W, T_N , และ T_S ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตั้งแต่ t ถึง $t + \Delta t$ ซึ่งมีหลายสมมติฐานและบางส่วนในนั้นเขียนได้เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [T_P^1 + (1-f)T_P^0] \Delta t \quad (12)$$

จากสมมติฐานในสมการที่ (12) ให้ค่าของ f เท่ากับ 1 ซึ่งจะหมายถึงระเบียบวิธีแบบปริยาย (implicit scheme) และประยุกต์สมการที่ (12) ใช้กับสมการที่ (11) แล้วทำการจัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (13)$$

เมื่อ

$$a_E = \frac{k_e \cdot \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (14-ก)$$

$$a_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (14-ข)$$

$$a_S = \frac{k_s \cdot \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (14-ค)$$

$$a_N = \frac{k_n \cdot \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (14-ง)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho c \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (14-จ)$$

$$b = a_P^0 T_P^0 \quad (14-ฉ)$$

$$a_P = a_P^0 + a_W + a_E + a_N + a_S \quad (14-ช)$$

ในบทความนี้ การหาสภาพการนำความร้อน(Thermal conductivity) แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

สภาพการนำความร้อนที่เกิดจากวัสดุ 2 ชนิด เขียนเป็นสมการ discretization

$$K_e = \frac{2 \cdot K_P K_E}{K_P + K_E} \quad (15-ก)$$

$$K_w = \frac{2 \cdot K_P K_W}{K_P + K_W} \quad (15-ข)$$

$$K_n = \frac{2 \cdot K_P K_N}{K_P + K_N} \quad (15-ค)$$

$$K_s = \frac{2 \cdot K_P K_S}{K_P + K_S} \quad (15-ง)$$

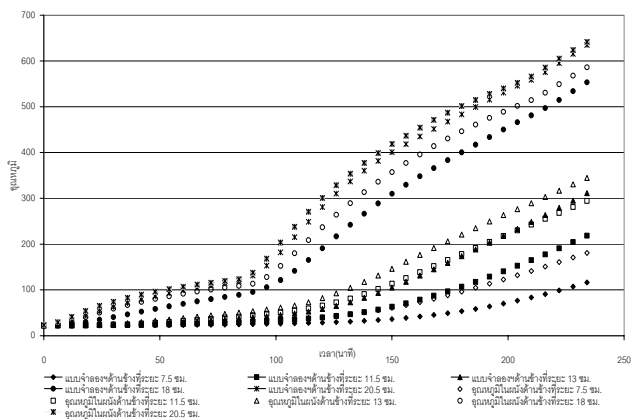
สภาพนำความร้อนที่เกิดจากอุณหภูมิของเซรามิกไฟเบอร์

$$K_f = 0.0616938432 \times e^{(0.00148978098 \cdot T_f)} \quad (16)$$

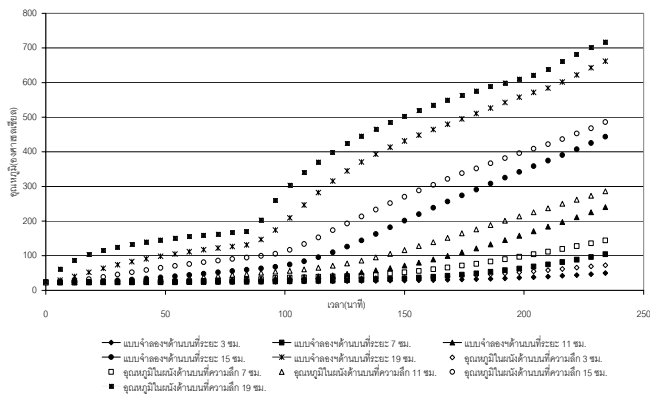
5 ผลการทดลอง

ในบทความนี้มีการทดลองเผาเซรามิกในเตาเผาเซรามิกที่จังหวัดลำปางเพื่อที่จะนำข้อมูลไปสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบนเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าจริง

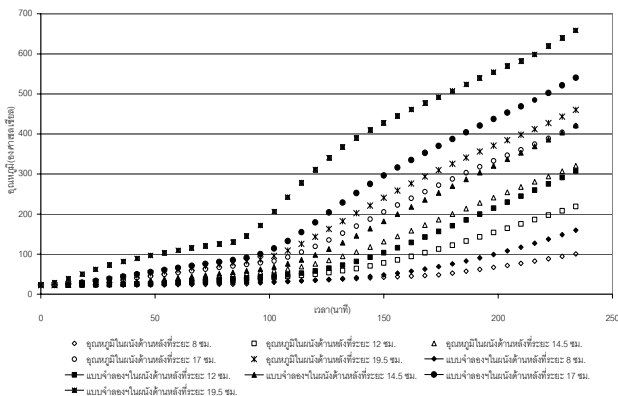


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริงสำหรับผนังด้านข้างของการทดลองที่ 11



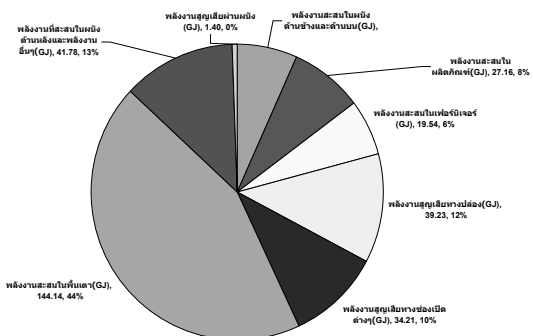
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริงสำหรับผนังด้านบนของการทดลองที่ 11

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิตั้งใน
ด้านหลังเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าจริง



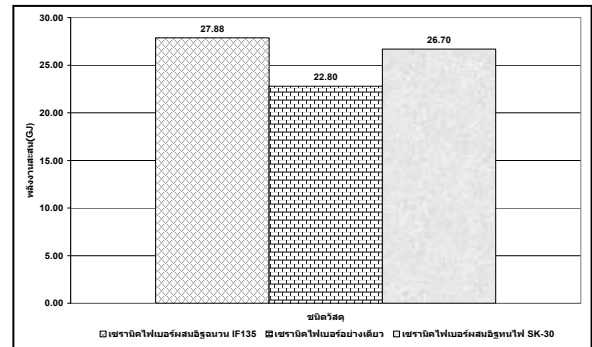
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริงสำหรับผนังด้านหลังของการทดลองที่ 11

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลังงานที่กระจาย
อยู่ในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิก



รูปที่ 9 พลังงานกระจายอยู่ในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิคของการ
ทดลองครั้งที่ 11

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนัง
ด้านข้างและด้านบน เมื่อมีการเปลี่ยนวัสดุผนังจากผนังเซรามิกไฟเบอร์
เป็นผนังผสมระหว่างเซรามิกไฟเบอร์และอิฐมวลเบา IF-135 และผนัง
ผสมระหว่างเซรามิกไฟเบอร์และอิฐทนไฟ SK-30 โดยการให้เงื่อนไข
ขอบเขตเหมือนเดิม



รูปที่ 10 พลังงานสะสมในวัสดุผนังชนิดต่างๆของการทดลองครั้งที่ 11

6 สรุปผลการทดลอง

1. ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบนด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สามารถทำนายแนวโน้มการกระจายของอุณหภูมิภายในผนังที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวัดจริง อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 15.5 % ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอยู่ใกล้ผนังด้านในก็จะมีคลาดเคลื่อนน้อย แต่ถ้าห่างออกไปจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เนื่องจากสภาพนำความร้อนในเตาเผาเซรามิกมีค่ามากกว่าสภาพนำความร้อนที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของเซรามิคไฟเบอร์ที่ด้านในมากกว่าการเสื่อมสภาพเซรามิคไฟเบอร์ที่ด้านนอกของเตาเผาเซรามิค ทำให้มีอัตราความร้อนไหลผ่านมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดที่คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง

2. ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้มวลและพลังงาน ทำให้ทราบว่าพลังงานที่เข้าสู่เตาเผาเซรามิกสะสมที่พื้นเตามากที่สุด เนื่องจากการเลือกใช้วัสดุพื้นเตาเป็นอิฐทนไฟที่มีความหนาแน่นสูง และมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากสำหรับการทดลองแต่ละครั้ง เช่นเดียวกับ พลังงานสะสมในผนังทั้งสามด้าน ส่วนพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากในแต่ละการทดลองคือพลังงานความร้อนที่สูญเสียผ่าน ช่องเปิดและทางปล่อง ส่วนความร้อนสูญเสียผ่านผนังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานอื่นๆ

3. ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนัง
ด้านข้างและด้านบน นำไปใช้ประโยชน์ในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำผนัง
เตาเผาเซรามิก ตัวอย่างเช่น การเลือกวัสดุที่ดีที่ใช้ทำผนังเป็น 2 ชนิด มี

พลังงานสะสมเมื่อเทียบกับผนังเซรามิกไฟเบอร์อย่างเดียรมีค่าแตกต่าง
15-20 % ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้

7 กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการ
อนุรักษ์พลังงาน โดยการวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง
ของบุคคลหลายท่าน คุณสมศักดิ์ วงศ์วาลย์ ผู้จัดการโรงงานสมศักดิ์
เซรามิค และพนักงานในแผนกเตาทุกคน ที่ให้การต้อนรับและอำนวยความสะดวก
ในการตรวจวัดระหว่างการวิจัยอย่างเต็มที่

8 เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราโมทย์ เตชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม.
พิมพ์ ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2538.
- [2] สมศรี จรุงเรือง. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์
ครั้งที่ 1.. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2542
- [3] Adams,J.A. and Rogers,D.F. Computer-Aided Heat Transfer
Analysis. New York :McGraw-Hill, 1973.
- [4] De monte F. Transient heat conduction in one-dimensional
composite slab. A 'natural'analytic approach.
International Journal of Heat and Mass Transfer 2000
: 3607-3619.
- [5] Incropera,F. P. and Dewitt D. P.. Fundamentals of Heat and
Mass Transfer.. 4th ed.. New York : Wiley, 1996.
- [6] Nyhoff,L. and Leestma,S. Fortran 90 for Engineers and
Scientists. New Jersey : Prentice-Hall International,
1997.
- [7] Patankar,S.V.. Numerical transfer and fluid flow. Series in
computational method in mechanics and thermal
sciences. U.S.A : Hemisphere Publishing, 1980.
- [8] Reed, J.R. North American combustion handbook.. 2nd ed..
Cleveland : North American Manufacturing
Company,1978.